

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»

доклад на тему:

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО
ПО ЭНЕРГОЗАТРАТАМ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ
ПОЗИЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО
ТОКА**

Дудник Алексей Валентинович

Ряд технических объектов характеризуются:

- 1) режимом частых пусков, остановок и реверсов;
- 2) необходимостью снижения затрат энергии;
- 3) необходимостью сохранения быстродействия (производительности);
- 4) ограничениями, накладываемыми на фазовые координаты.



Математическая модель позиционного привода постоянного тока

$$\begin{cases} \frac{d\varphi^*}{dt} = c\Omega; \\ U = R_{\text{я}} I_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + k_e \Phi_{\text{в}} \Omega; \\ J \frac{d\Omega}{dt} = k_m \Phi_{\text{в}} I_{\text{я}} - M_{\text{н}}, \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{d\varphi}{d\tau} = \omega; \\ \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{1}{\beta_m} (i - m_n); \\ \frac{di}{d\tau} = u^* - i - \omega. \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu; \\ y = Cx, \end{cases}$$

Вектор состояний $x = \begin{bmatrix} I \\ \Omega \\ \varphi \end{bmatrix}$

Вектор входных воздействий $u = \begin{bmatrix} u \\ M_{\text{н}} \end{bmatrix}$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{\text{я}}} & -\frac{k_e \Phi_{\text{в}}}{RT_{\text{я}}} & 0 \\ \frac{k_m \Phi_{\text{в}}}{J} & 0 & 0 \\ 0 & c & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{RT_{\text{я}}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ограничения фазовых координат в физических величинах

$$|U(t)| \leq U_{\max} \quad |\Omega(t)| \leq \Omega_{\max} \quad |I(t)| \leq I_{\max} \approx (2,5 - 10)I_{\text{ном}}$$

$$\left| \frac{dI(t)}{dt} \right| \leq \left| \frac{dI}{dt} \right|_{\max} \approx (50 - 300)I_{\text{ном}} / \text{сек}$$

Ограничения фазовых координат относительных единиц

$$\left\{ \begin{array}{l} |u(\tau)| \leq 1; \\ |\omega(\tau)| \leq \alpha_{\omega}; \\ |i(\tau)| \leq \alpha_i; \\ \left| \frac{di}{dt} \right| \leq \alpha_{i'}; \end{array} \right.$$

Критерий оптимальности

$$q = \int_0^{\tau_k} i^2(\tau) d\tau \rightarrow \min \quad \text{минимизация затрат энергии}$$

τ_k — время переходного процесса.

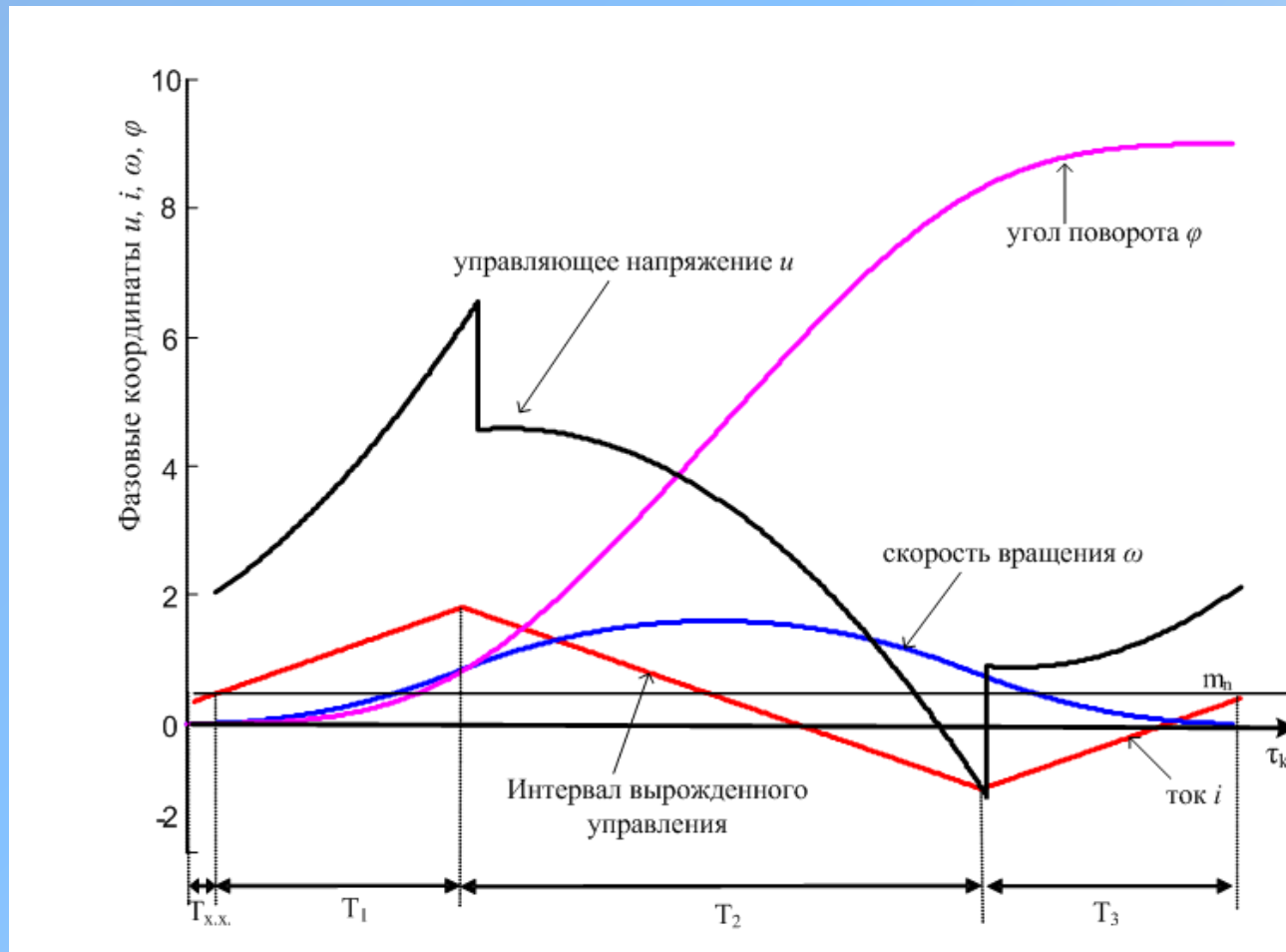
$$\tau_k = \int_0^T 1 \cdot d\tau \rightarrow \min \quad \begin{array}{l} \text{минимизация длительности} \\ \text{переходного процесса} \end{array}$$

Решение задачи оптимального управления принципом максимума

$$U_o = U_{\max} \operatorname{sign}(\psi_3) \quad \text{На невырожденных интервалах}$$

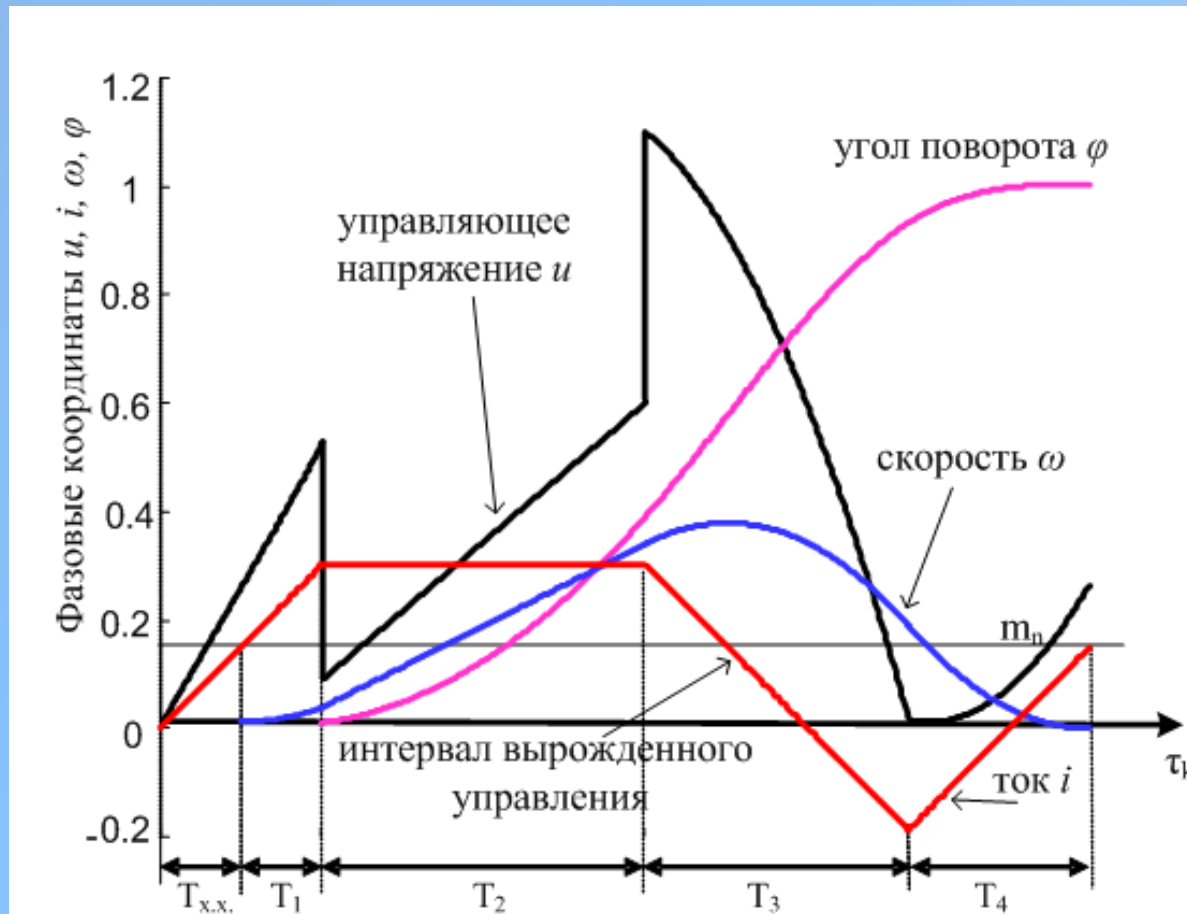
$$i = \frac{\psi_{20}}{2\beta_m} - \frac{\psi_{10}}{2\beta_m} \tau \quad \text{На вырожденном интервале}$$

3-интервальный закон оптимального управления



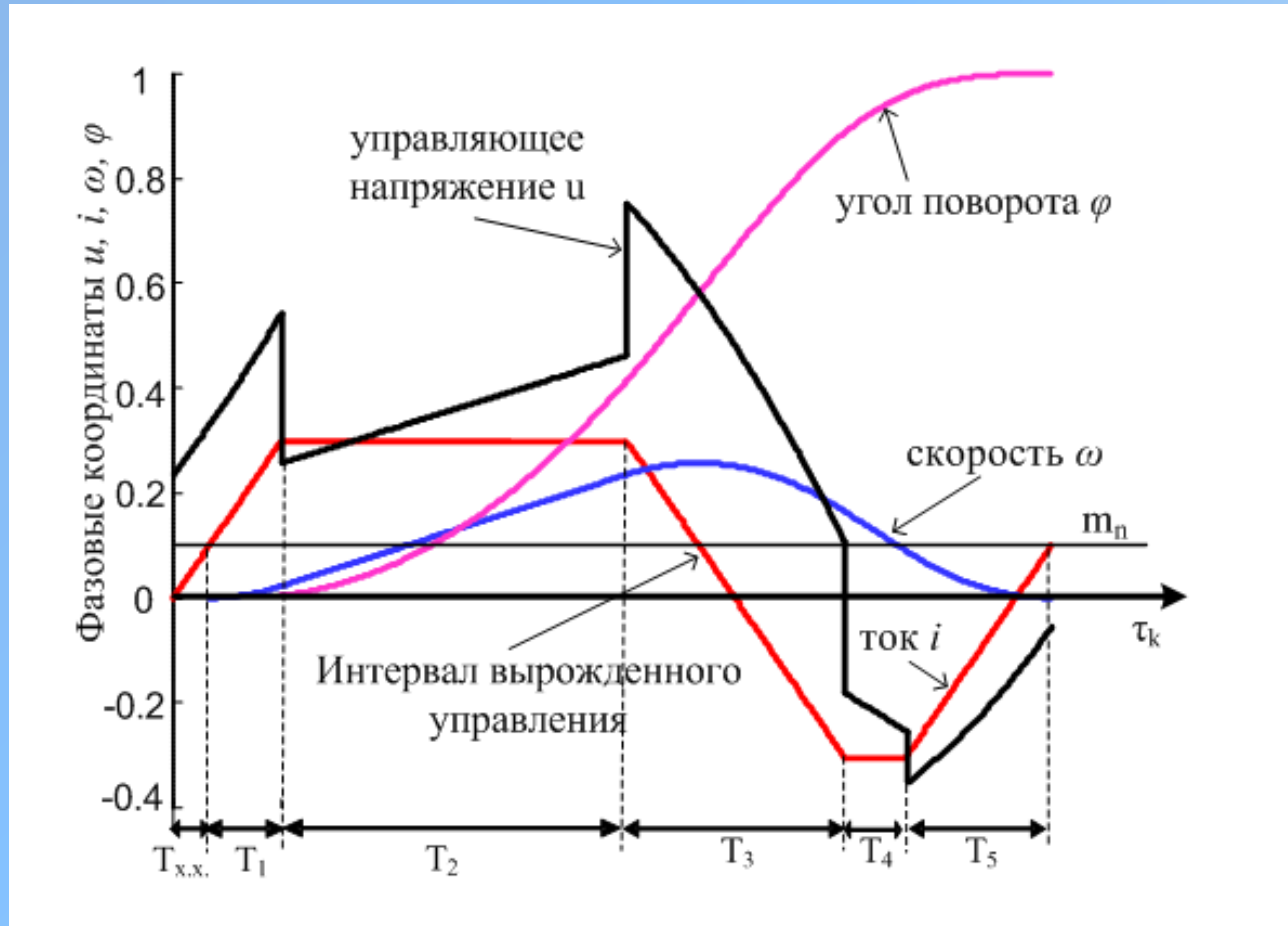
$$\gamma_{i'} = \frac{2\alpha_{i'}T_1}{\tau_a - 2T_1}$$

4-интервальный закон оптимального управления



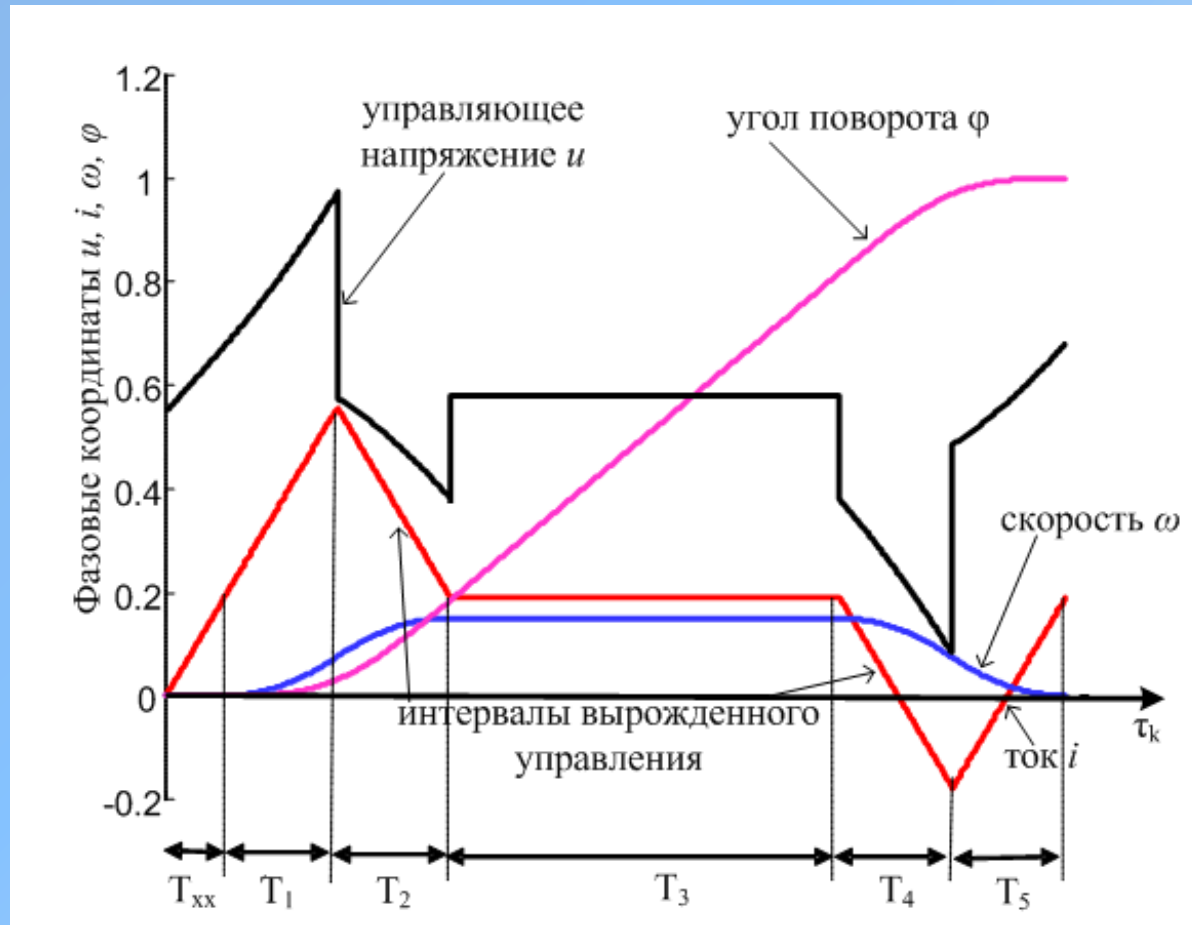
$$\gamma_i' = - \frac{(\alpha_i - m_n + \alpha_i T_4)^2}{2\beta_m K + 2(\alpha_i - m_n + \frac{1}{2}\alpha_i T_4)T_4}$$

5-интервальный закон оптимального управления



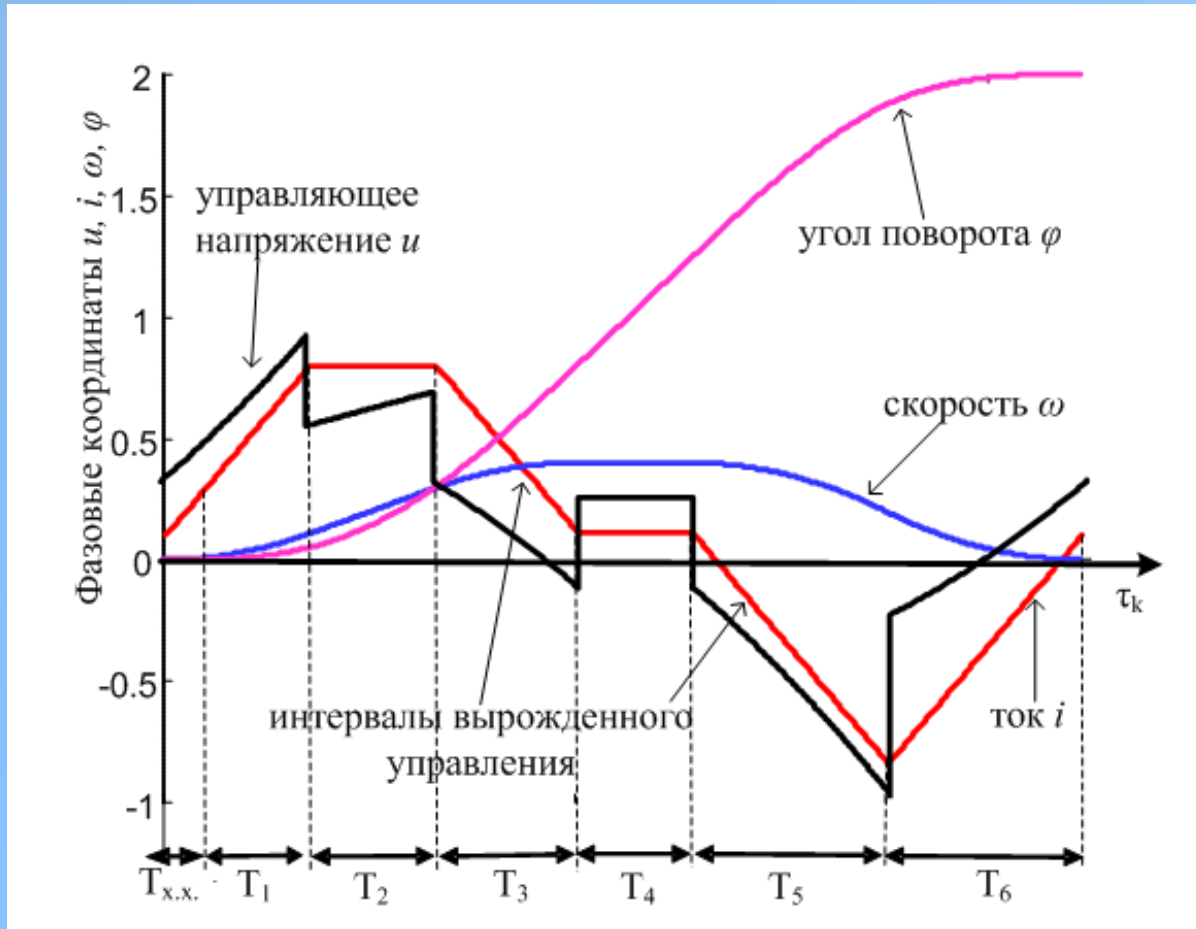
$$\gamma_{i'} = \sqrt{\frac{K1}{K2}}$$

5-интервальный закон оптимального управления с ограничением по скорости



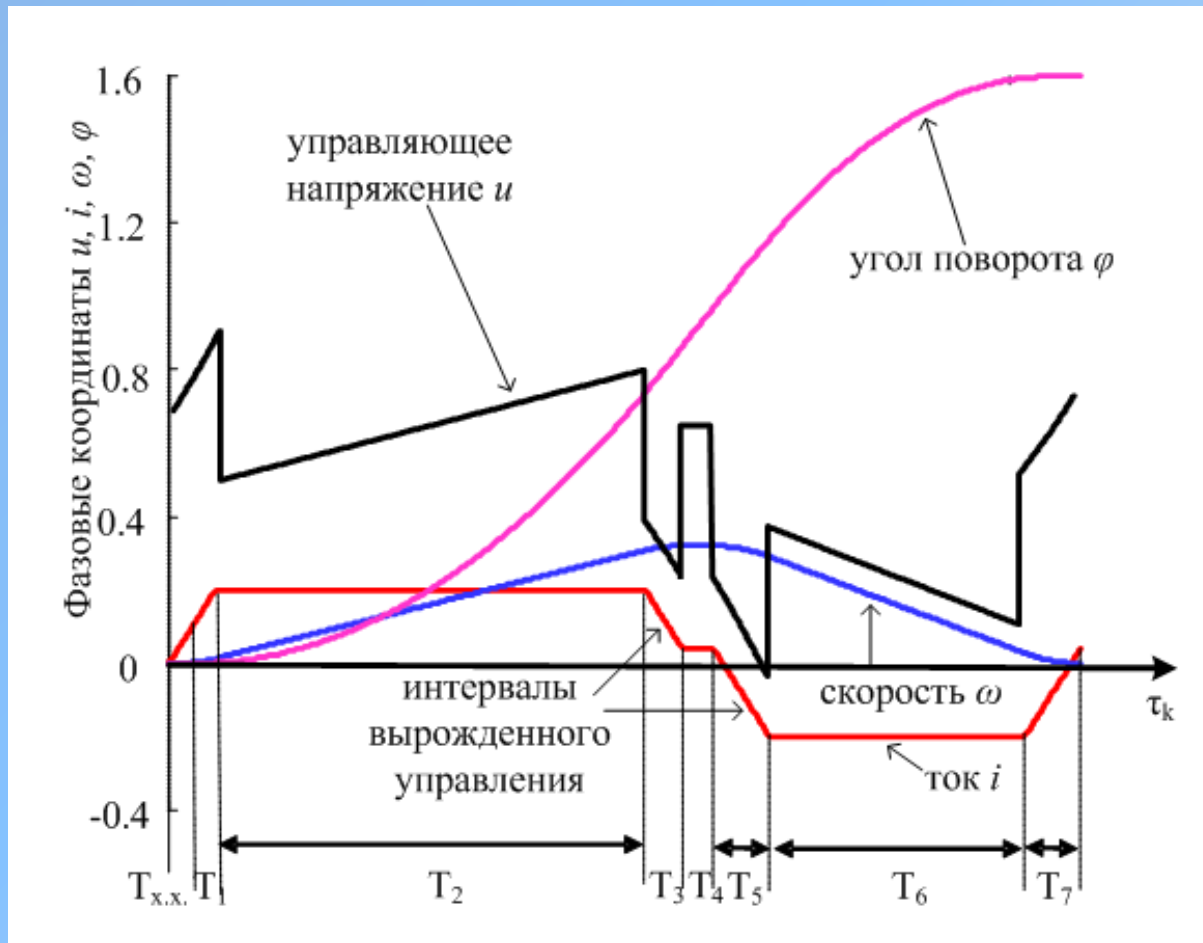
$$8\alpha_{\omega}^3\beta_m\left(-\frac{\gamma_{i'}^3}{\alpha_{i'}^2}-\frac{\gamma_{i'}^2}{\alpha_{i'}}-\frac{1}{3}\gamma_{i'}\right)^2=(\varphi_k-\alpha_{\omega}T_3)^2\left(\frac{\gamma_{i'}^2}{\alpha_{i'}}+\gamma_{i'}\right)^3$$

6-интервальный закон оптимального управления



$$\left(K + \frac{(\alpha_i - m_n)^3}{24\beta_m} \left(\frac{1}{\alpha_{i'}^2} - \frac{1}{\gamma_{i'}^2}\right)\right)^2 \alpha_{i'} \left(1 + \frac{\alpha_{i'}}{\gamma_{i'}}\right)^3 - 2\beta_m \alpha_{\omega}^3 \left(\frac{\alpha_{i'}^2}{3\gamma_{i'}^2} + \frac{\alpha_{i'}}{\gamma_{i'}} + \frac{2}{3}\right)^2 = 0$$

7-интервальный закон оптимального управления



$$\gamma_{i'} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$$

Вид управляющего воздействия при различных законах изменения тока

$$u = \alpha_{i'} + m_n + \alpha_{i'}\tau + \frac{1}{2\beta_m} \alpha_{i'}\tau^2$$

Ток изменяется
по линейному закону

$$u = \alpha_i + \alpha_{i'}\tau + \omega_1 + \frac{1}{\beta_m}(\alpha_i - m_n)\tau$$

Ток удерживается
на максимальной величине

$$u = m_n + \alpha_\omega$$

Ток удерживается равным
нагрузке (в относительных единицах)

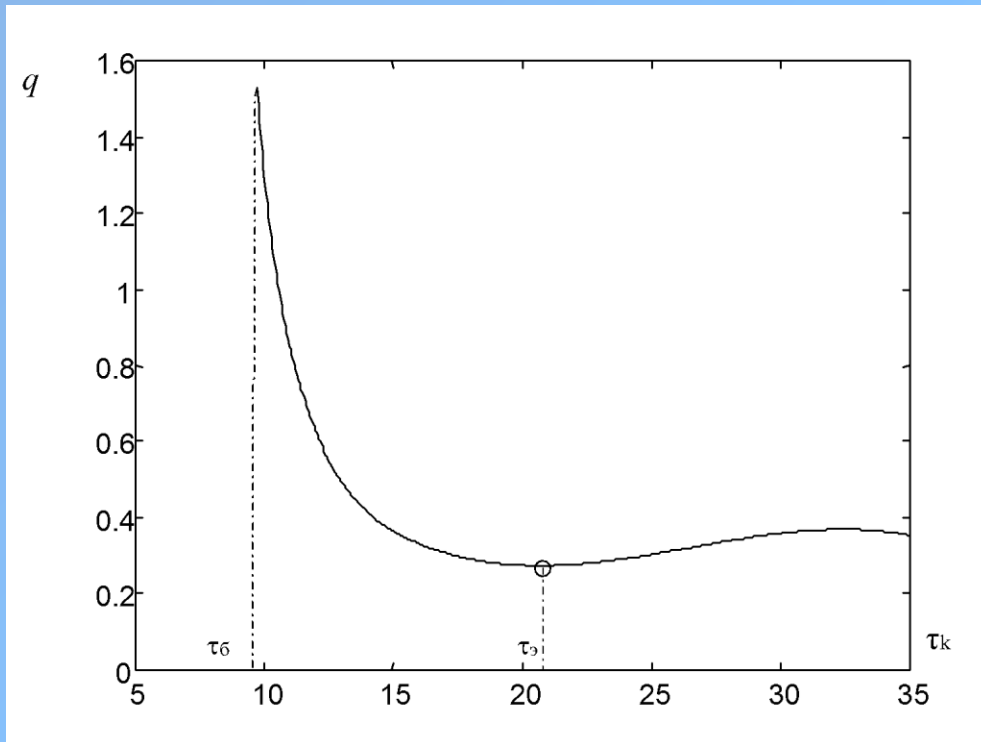
Зависимость затрат энергии от длительности переходного процесса

Условие минимума
затрат энергии

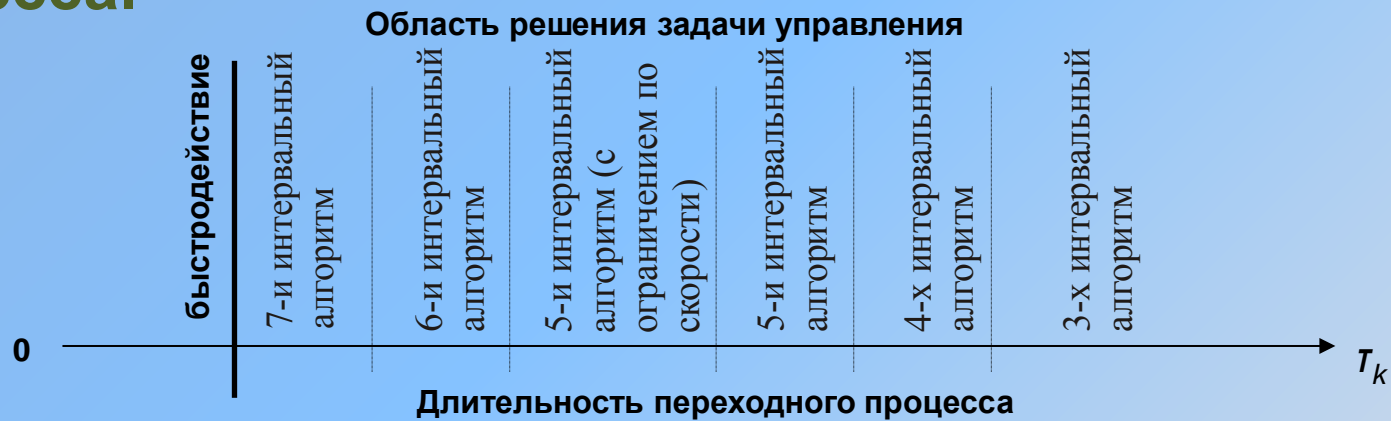
$$i_{\max} = 2m_n$$

Условие минимума
длительности
переходного процесса

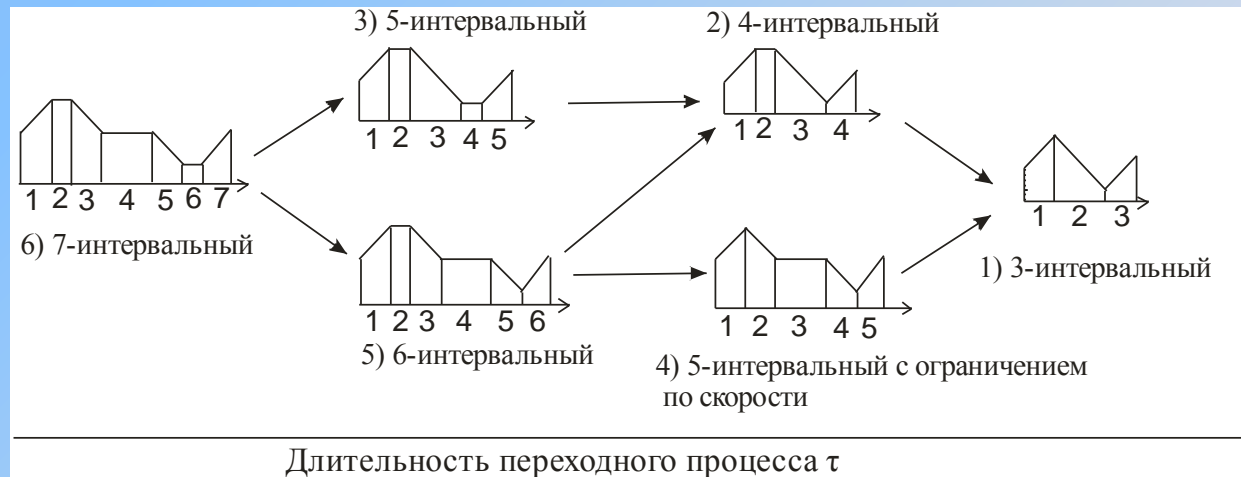
$$\frac{di}{dt} = \alpha_{i'_{\max}}$$



Порядок размещения алгоритмов управления в зависимости от длительности переходного процесса.



Граф-схема трансформации алгоритмов управления



Скорость изменения тока на энергосберегающем интервале в точках трансформации алгоритмов

$$\gamma_{i'} = \frac{(\alpha_i + m_n)^2}{2\beta_m \alpha_\omega - \frac{(\alpha_i + m_n)^2}{\alpha_{i'}}}$$

Граница 7-ми и 6-ти интервального алгоритмов

$$\gamma_{i'} = \frac{1}{\frac{2\alpha_\omega \beta_m}{(\alpha_i - m_n)^2} - \frac{1}{\alpha_{i'}}}$$

6-ти и 5-ти интервального с ограничением по скорости алгоритмов

$$\gamma_{i'} = \frac{\alpha_{i'}^2}{\frac{2\alpha_\omega \beta_m}{T_1^2} - \alpha_{i'}}$$

Граница 5-ти интервального с ограничением по скорости и 3-х интервального алгоритмов

$$a_8 \gamma_{i'}^8 + a_7 \gamma_{i'}^7 + a_6 \gamma_{i'}^6 + a_5 \gamma_{i'}^5 + a_4 \gamma_{i'}^4 + a_3 \gamma_{i'}^3 + a_2 \gamma_{i'}^2 + a_1 \gamma_{i'} = 0,$$

Граница 6-ти и 4-х интервального алгоритмов

$$\gamma_{i'} = 2 \frac{\alpha_i - m_n}{T_3}$$

Граница 4-х и 3-х интервального алгоритмов

$$\gamma_{i'} = \frac{2A}{-B + \sqrt{B^2 - 4AD}},$$

Граница 7-ми и 5-ти интервальных алгоритмов

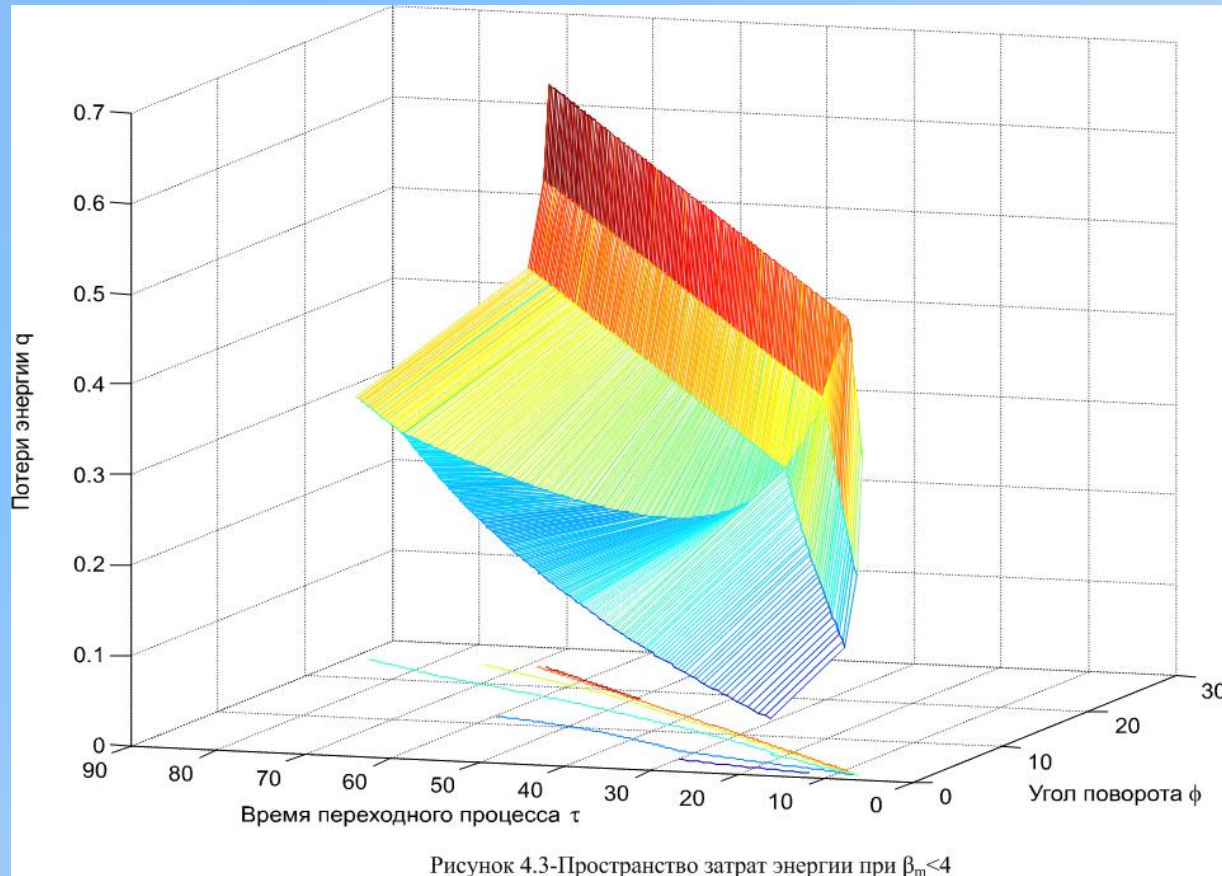
$$\gamma_{i'} = \frac{2A}{-B + \sqrt{B^2 - 4AD}},$$

Граница 5-ти и 4-х интервальных алгоритмов

Минимум энергозатрат для 3-х и 5-ти интервального с ограничением по скорости алгоритмов

$$\gamma_{i'} = \frac{m_n^2}{2\beta_m(\alpha_\omega - \omega_2)} \quad \text{5-ти интервальный} \quad \gamma_{i'} = \frac{2m_n}{T_2} \quad \text{3-х интервальный}$$

Пространство энергозатрат



Выводы

1. Получен общий вид 6-ти многоинтервальных законов оптимального управления позиционным электроприводом и соответствующие диаграммы электрического тока.
2. Получены математические зависимости для определения длительностей интервалов управления, углов наклона токовых диаграмм и управляющего воздействия, которое описывается полиномами 0-, 1- и 2-го порядка.
3. Определены границы области, в рамках которой установлен порядок следования законов оптимального управления.
4. На основании аналитических зависимостей, полученных для точек соприкосновения законов управления, разработан поисковый алгоритм реального времени.
5. Построено пространство энергозатрат для определения оптимального времени переходного процесса и затрат энергии при заданном угле поворота.

Спасибо за внимание!